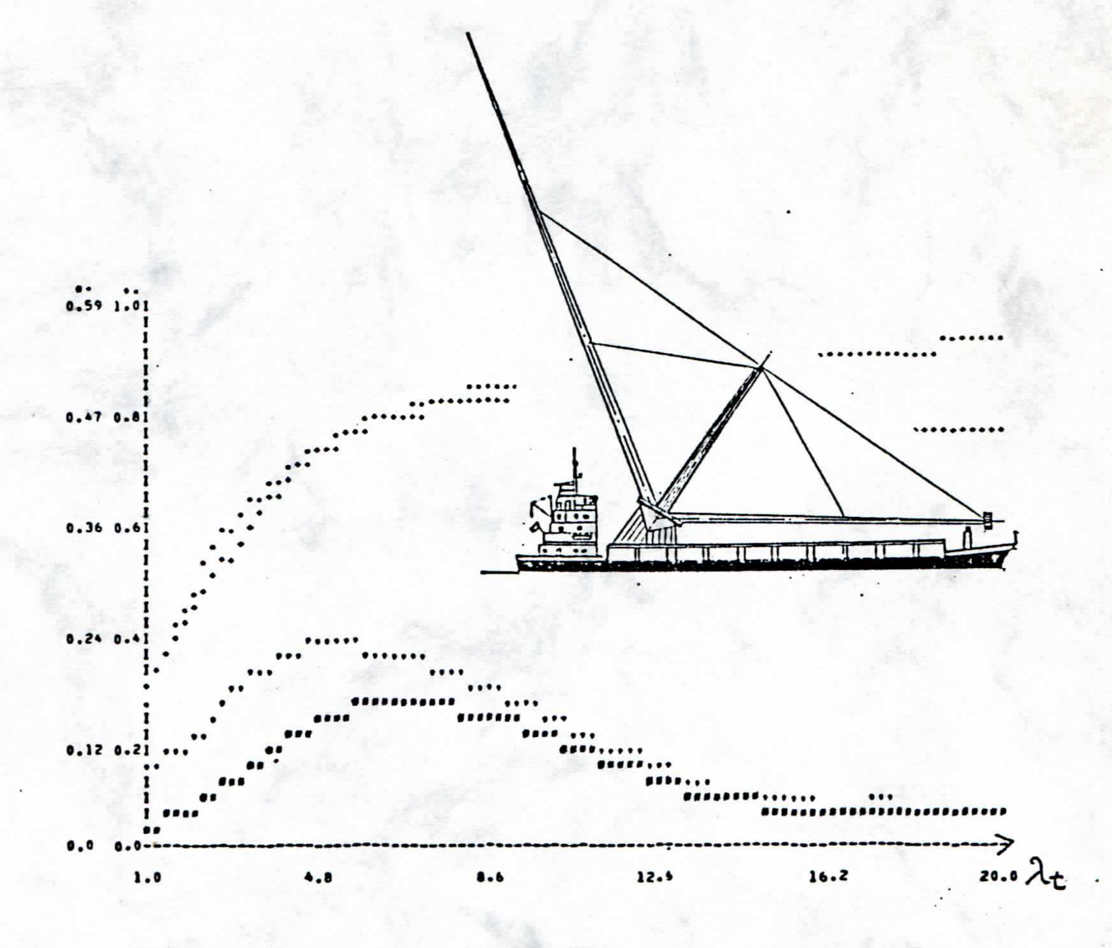
IfM
Institut für Mechanik
Universität Hannover

Dieter Lindemann

Zur aerodynamischen Berechnung eines Windenergie-Konverters am Beispiel des Wagner-Rotors

Seminarvortrag vom 19.06.1985



DOI:
https://doi.org/10.15488/9407

URN:
https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:18302-aero1985-06-19.010

Associated URLs:
https://nbn-resolving.org/html/urn:nbn:de:gbv:18302-aero1985-06-19.010



Dieter Lindemann (Dieter Scholz) https://orcid.org/0000-0002-8188-7269

Digital copy produced: 2020

Seminarvortrag vom 19.06.1985

Thema:

Zur aerodynamischen Berechnung eines Windenergie-Konverters am Beispiel des Wagner-Rotors

Vortragender: Dieter Lindemann

Institut für Mechanik, Universität Hannover



Liste der Symbole

Symbol	Bedeutung
α	Profilanströmwinkel
β	Blattwinkel
κ	Konuswinkel
τ	Achswinkel
θ	Umlaufwinkel
λ	Schnellaufzahl
ξ	Abminderungsfaktor
σ	Drallfaktor
ε	Gleitzahl
λ_o	effektive Schnellaufzahl
λ_t	Blattspitzenschnellaufzahl
c_a	Auftriebsbeiwert
r	Radius
t	Flügeltiefe
z	Blatt-(Flügel-)zahl
c_{pi}	idealer Leistungsbeiwert
η_p	Profilreibungs-Verlustfaktor
η_z	Blattzahlverlustfaktor
c_{pges}	Gesamtleistungsbeiwert
u	Umfangs-(Tangential-)geschwindigkeit
v	Geschwindigkeit senkrecht zur Kegelmantelfläche
P	Windradleistung
P_0	Gesamtwindleistung
ρ	Luftdichte
A_2	Projektionsfläche des Windrades zum Wind
R	Maximalradius
v_w	Windgeschwindigkeit
$\vec{x}$	Kegelmantelfläche (in Kart. Koordinaten)
$\vec{n}$	Normalenvektor auf Kegelmantelfläche
$v_{w\vec{n}}$	Projektion von $\vec{v}_w$ in Richtung $-\vec{n}$
ω	Kreisfrequenz
u_1^*	Umfangs-(Tangential)geschw. bei Windstille
u_1	Umfangs-(Tangential-)geschwindigkeit

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Der Wagner-Rotor
3. Windradberechnung
4. Strömung am Flügelelement
5. Kenngrößen
6. Wirkungsgradberechnung
   6.1 Idealer Leistungsbeiwert
   6.2 Profilreibungs-Verlustfaktor
   6.3 Blattzahlverlustfaktor
   6.4 Gesamtleistungsbeiwert
   6.5 Berechnung des Abminderungsfaktors
7. Programm zur Windradberechnung
8. Ergebnisse
9. Zusammenfassung
10. Anhang
   10.1 Berechnung der Schnellaufzahl λ am Flügelelement
   10.2 Programmliste des Programms zur Windradberechnung mit Hinweisen für Programmbenutzer
   10.3 Eingabewerte für die Beispielplotts zum Seminarvortrag und Wertetabellen

1. Einleitung

Die Windenergie wird schon seit vielen hundert oder gar tausend Jahren genutzt. Die "Bockwindmühle" kannte man schon im Spätmittelalter. Das Mühlenhaus stand auf einem Bock (daher der Name) und wurde auf diesem gedreht und der Windrichtung nachgeführt. Die Windmühlen konnten größer gebaut werden, als man nur noch den Mühlenkopf der Windrichtung nachführte. Dieser Mühlentyp heißt "Holländer Windmühle". Nun müssen Windräder aber nicht, wie diese, 4 Flügel haben. Die "Amerikanische Windturbine" aus dem 19. Jahrhundert hatte oft mehr als 40 Flügel; der Monopterus, eine deutsche Forchungsanlage, hingegen hat nur einen Flügel. Die Windradachse kann auch vertikal angeordnet sein. Der Savonius- und der Darrieusrotor sind Beispiele für solche Vertikalachsrotoren.

2. Der Wagner-Rotor

In diese Reihe geschichtlicher Entwicklung und Verschiedenartigkeit gliedert sich auch der Wagner-Rotor ein: Abb.1. Der Wagner-Rotor ist ein Windrad mit einem Achswinkel τ deutlich verschieden von 0° bzw. 90° und einem Konuswinkel $\varkappa$ der Flügel deutlich verschieden von 90°. Der Wind strömt dabei in den, von den Flügeln gebildeten Kegel hinein. Da der Wagner-Rotor bei entsprechender Winkelwahl keinen Turm benötigt, und daher auch einen geringen Schwerpunkt hat, kann er auch auf einem Schiff montiert werden und die hohen Windstärken auf See nutzen.

3. Windradberechnung

Bei der Windradberechnung geht man einerseits aus von den Grundgleichungen der Strömungsmechanik: Kontinuitätsgleichung, Energieerhaltungssatz, Impulssatz und andererseits von den gemessenen Größen Auftriebsbeiwert c_a und Gleitzahl ε zur Beschreibung des Profilverhaltens unter Berücksichtigung vom Turbulenzgrad und der Zähigkeit. Die Strömung wird als inkompressibel angesehen. Die Betrachtung ist zunächst eindimensional. Zusammen ergibt dies ein math./phys. Modell der Windradberechnung. Aus dem Modell erhält man sowohl Kenngrößen und Wirkungsgrade als auch Auslegungskriterien wie Flügeltiefe und Anstellwinkel. Die Berechnung wird für einzelne Flügelelemente durchgeführt, die zusammen das Gesamtverhalten des Rotors ergeben.

Der Wagner-Rotor

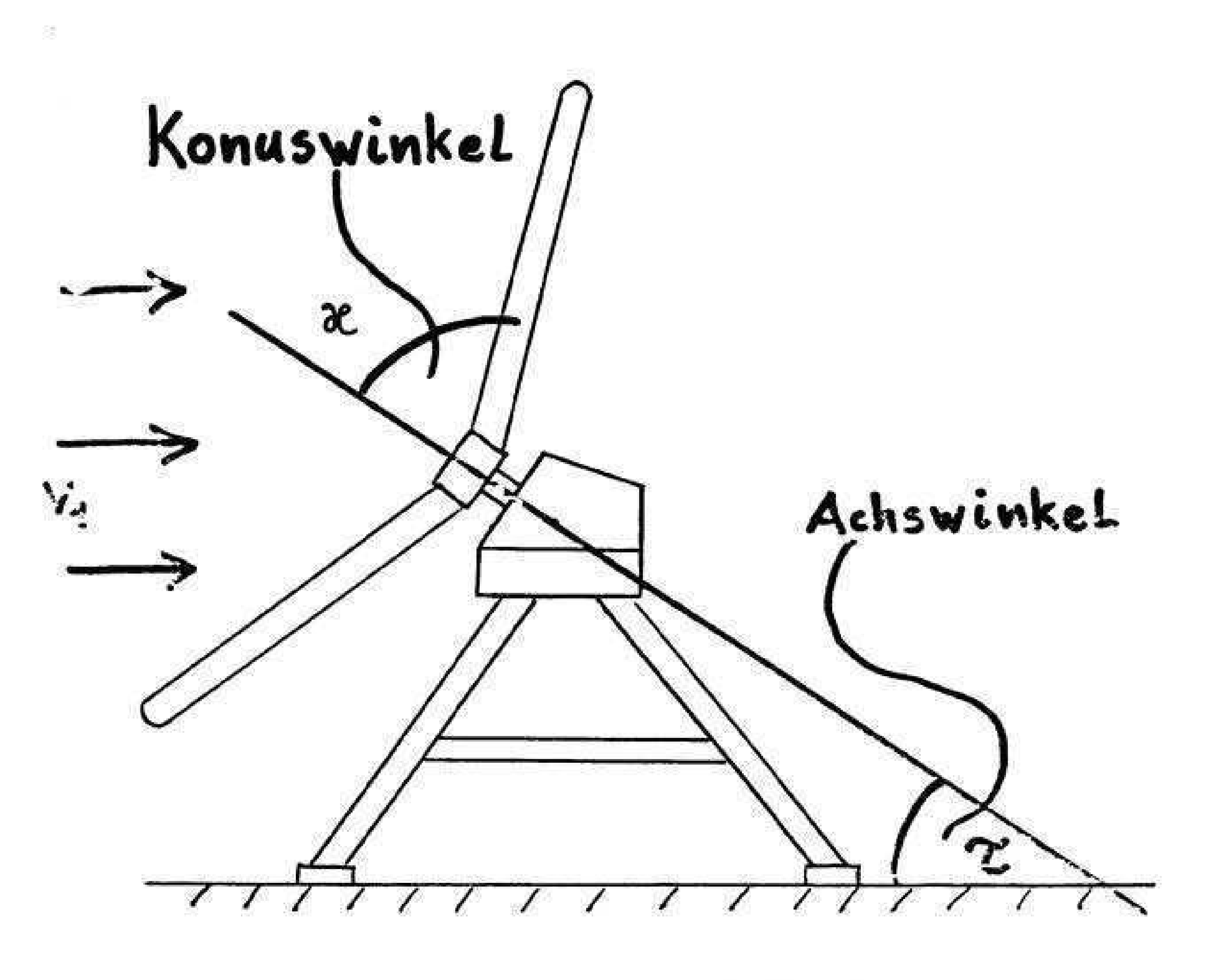


Abb. 1

4. Strömung am Flügelelement (siehe Abb. 2)

Man kann sich leicht vorstellen, daß ein Flügelelement des Wagner-Rotors, das sich auf dem, von den Flügeln gebildeten, Trichter bzw. Kegelmantel bewegt, auf einer Kreisbahn um die Drehachse umläuft. Dieses Teilchen erfährt durch die Drehung eine Geschwindigkeit tangential zur Kegelmantelfläche, die Umfangsgeschwindigkeit u und durch die Windgeschwindigkeit eine Geschwindigkeit senkrecht zur Mantelfläche, genannt v. Man stellt sich nun das Flügelelement in Drehung an drei verschiedenen Orten vor:

- vor dem Rotor in unbeeinflußter Strömung: Ebene 1
- in seiner wirklichen Stellung: Ebene 2
- hinter dem Rotor, dort wo die Beeinflusssung der Strömung durch den Rotor abgeschlossen ist: Ebene 3

Soll der Strömung Energie entzogen werden, muß die Geschwindigkeit v_1 (Index steht für die Ebene) auf v_3 abgemindert werden. Wird das Windrad von der Strömung angetrieben, so wirkt nicht nur von der Luft ein Moment auf den Rotor, sondern auch ein Moment vom Rotor auf die Strömung. Dies verursacht einen Drall der Strömung und eine Vergrößerung der tangentialen Geschwindigkeit von u_1 auf u_3. Die Anströmgeschwindigkeit w ist die vektorielle Addition von u und v.

5. Kenngrößen

Aus dem math./phys. Modell leitet man zunächst Kenngrößen zur Beschreibung des Windrades ab: Die Schnellaufzahl λ ist das Verhältnis aus Tangentialgeschwindigkeit u_1 zur Geschwindigkeit senkrecht zum Kegelmantel v_1.

$$\lambda = u_1 / v_1 \qquad \text{Gl. 1}$$

Die effektive Schnellaufzahl λ_0 beschreibt das gleiche Verhältnis, jedoch nicht in der Ebene 1, sondern in der Ebene 2, also am tatsächlichen Ort des Flügelelementes.

$$\lambda_0 = u_2 / v_2 \qquad \text{Gl. 2}$$

Die Blattspitzenschnellaufzahl λ_t ist die Schnellaufzahl λ, die an der Blattspitze auftritt.
Der Abminderungsfaktor ξ beschreibt die Abbremsung der Windgeschwindigkeit beim Durchtritt durch den Rotor:

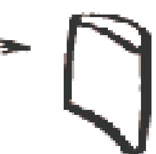
$$\xi = v_3 / v_1 \qquad \text{Gl. 3}$$

Der Abminderungsfaktor kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Eine Zahl nahe 0 bedeutet eine starke Abminderung.
Der Drallfaktor σ ist definiert als das Verhältnis der Tangentialgeschwindigkeiten:

$$\sigma = u_3 / u_1 \qquad \text{Gl. 4}$$

Der Drallfaktor ist immer größer oder gleich 1. Weitere Kenngrößen sind der Auftriebsbeiwert c_a und die Gleitzahl ε.

Strömung am Flügelelement



$W_1 = W_2 = W_3$

$\frac{1}{2}\Delta u$

Δu

w_1 u_1 v_1

w_2 u_2 v_2

w_3 u_3 v_3

$\approx 5 \cdot D$

$\approx 5 \cdot D$

Abb. 2

6. Wirkungsgradberechnung

In der Windradberechnung kennt man drei Einzelwirkungsgrade und einen daraus berechneten Gesamtwirkungsgrad. Aufbauend auf dem Modell zur Windradberechnung, trieben Leute wie Prandtl, Betz und Hütter die Windradberechnung voran, so daß es in der Zeit um den 2. Weltkrieg gelang, Formeln für die theoretische Berechnung der Wirkungsgrade aufzustellen:

6.1 Der ideale Leistungsbeiwert

ist definiert als Quotient aus Windradleistung P und Gesamtleistung P_0 durch die Windradfläche.

$$c_{Pi} = P/P_0 \qquad \text{Gl. 5}$$

Mit "ideal" ist gemeint, daß ein Flügel ohne Verluste vorausgesetzt wird. Die theoretische Windradberechnung liefert die Formel

$$c_{Pi} = \lambda^2 (1+\xi)(\sigma-1) \qquad \text{Gl. 6}$$

$$\sigma = \sqrt{1+(1-\xi^2)/\lambda^2} \qquad \text{Gl. 7}$$

Der ideale Leistungsbeiwert ist also abhängig von der Schnellaufzahl und dem Abminderungsfaktor; Abb.3 zeigt dies. Bei unbeeinflußter Strömung, d.h. $\xi=1$, ist der Leistungsbeiwert 0. Mit zunehmender Abminderung steigt er an, erreicht bei einer optimalen Abminderung ξ_{opt} den größten Wert und fällt dann bei sehr starker Abminderung, wegen eines Luftstaus und vermindertem Luftdurchsatz, wieder ab. Weiterhin steigt der Leistungsbeiwert mit zunehmender Schnellaufzahl (siehe auch Abb.4).
Der Leistungsbeiwert kann max. den Wert 16/27=0.593 annehmen. Dieser Wert wird bei einer Abminderung von 1/3 und unendlich großer Schnellaufzahl erreicht. Der Leistungsbeiwert c_{pi} gilt zunächst nur für ein Flügelelement.

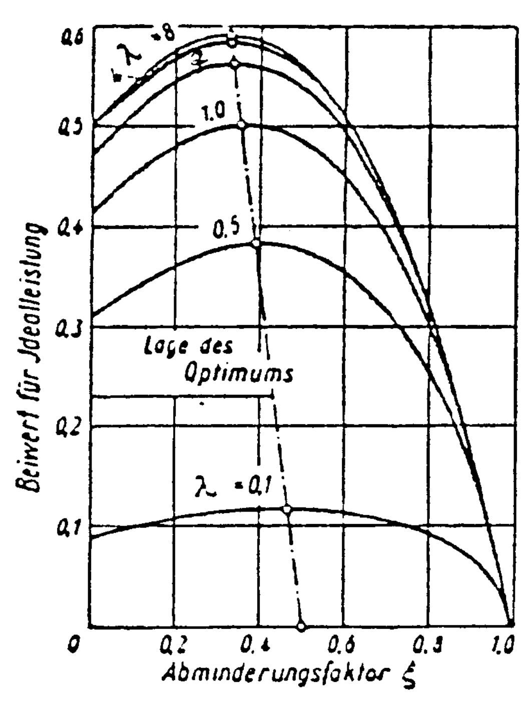


Abb. 3 Der ideale Leistungsbeiwert /1/

$$c_{pi} = c_{pi}(\lambda, \xi)$$

6.2 Der Profilreibungs-Verlustfaktor

ist folgendermaßen definiert:

$$\eta_P = \frac{\text{nützliche Vortriebsleistung am Flügel}}{\text{entnommene Leistung aus der Strömung}} \qquad \text{Gl. 8}$$

Er beschreibt also das Verhältnis Nutzen zu Aufwand am Flügel. Die theoretische Windradberechnung liefert

$$\eta_P = \frac{2\lambda(\varepsilon - \lambda_0)}{(1+\xi)(1+\varepsilon\lambda_0)} \qquad \text{Gl. 9}$$

Der Profilreibungs-Verlustfaktor ist also Abhängig von der Schnellaufzahl λ, der Gleitzahl ε, der effektiven Schnellaufzahl λ_0 und dem Abminderungsfaktor ξ. Nimmt man eine optimale Abminderung an, so zeigt Abb.5 den Profilreibungs-Verlustfaktor aufgetragen über der Schnellaufzahl mit der Gleitzahl als Parameter. Sieht man einmal von sehr kleinen Schnellaufzahlen ab, so fällt der Profilreibungs-Verlustfaktor mit zunehmender Schnellaufzahl und abnehmender Gleitzahl. Auch der Profilreibungs-Verlustfaktor gilt zunächst nur für ein Flügelelement.

6.3 Der Blattzahlverlustfaktor

berücksichtigt die induzierte Wirbelbildung an den Flügelenden. Diese Wirbel werden durch Ausgleichsvorgänge verursacht, die sich aus dem Druckunterschied am Flügel ergeben: Überdruck auf der Flügelunterseite und Unterdruck auf der Flügeloberseite.
Der Blattzahlverlustfaktor berücksichtigt weiter die "Luftstreifenbreite", also den Abstand der Flügel voneinander. Hat ein Rotor viele Flügel, so ist die Luftstreifenbreite gering, die vom jeweiligen Flügel zu kontrollieren ist, und der Flügel kann seine Aufgabe besser erfüllen.
Der Blattzahlverlustfaktor kann nicht exakt berechnet werden. Man ist hier auf Näherungsformeln angewiesen. Hütter, /1/, gibt eine solche Formel an:

$$\eta_Z = (1 - 1{,}39/(z\sqrt{1+\lambda_t^2}))^2 \qquad \text{Gl. 10}$$

Diese Abhängigkeit des Blattzahlverlustfaktors von der Blattzahl und der Blattspitzenschnellaufzahl wird in Abb.6 wiedergegeben. Der Blattzahlverlustfaktor gilt für den ganzen Rotor.

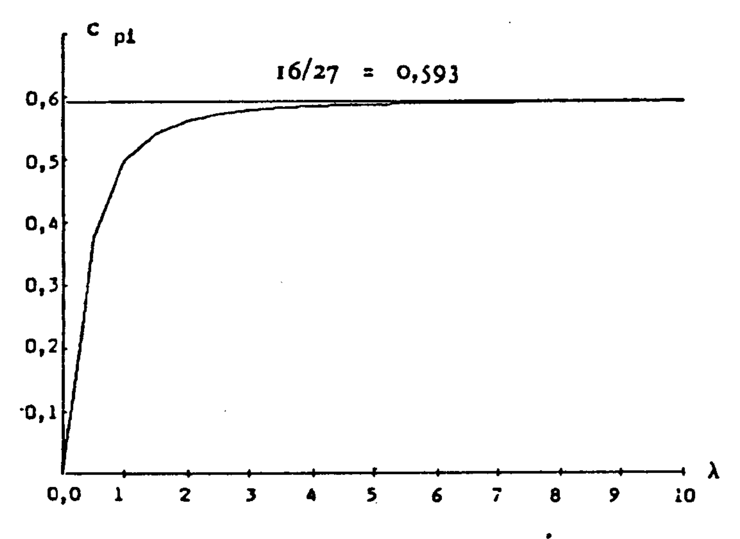


Abb. 4 idealer Leistungsbeiwert /2/

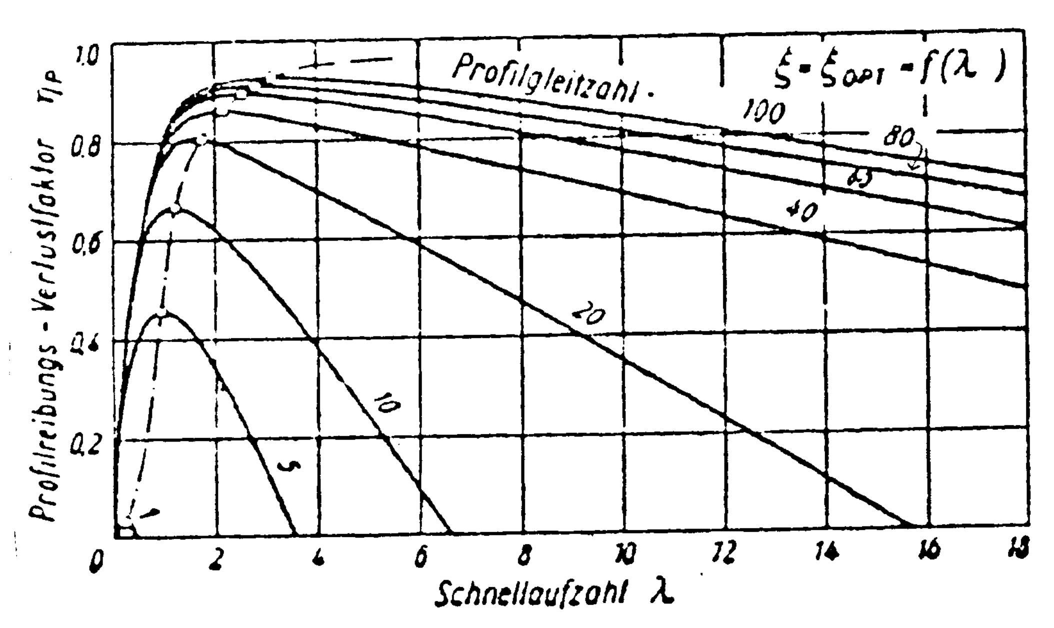


Abb. 5 **Profilreibungsverlustfaktor.** /1/

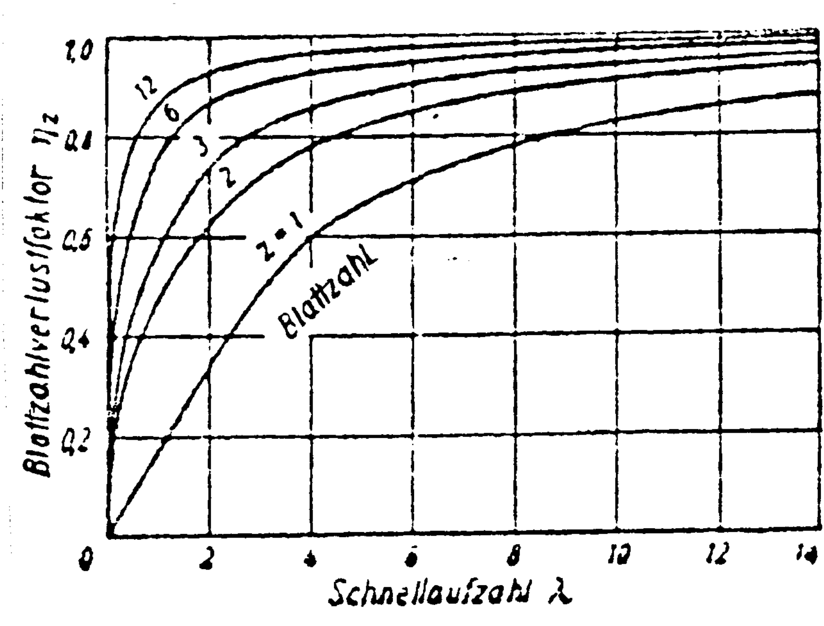


Abb. 6 **Blattzahlverlustfaktor** /1/

6.4 Der Gesamtleistungsbeiwert ist wieder definiert als Quotient aus Windradleistung P und Gesamtwindleistung P_0 durch die Windradfläche. Hierbei sind jetzt alle Verluste berücksichtigt.

$$c_{pges} = P/P_0 \qquad \text{Gl. 11}$$

Die Gesamtwindleistung P_0 kann bei konstanter Windgeschwindigkeit nach der Formel

$$P_0 = 1/2 \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v_1{}^3 \qquad \text{Gl. 12}$$

berechnet werden. Dabei ist ρ die Luftdichte und A_2 die Projektionsfläche des Windrades zur Windrichtung. Ist der Gesamtwirkungsgrad bekannt, kann leicht die Gesamtleistung berechnet werden. Der Gesamtleisungsbeiwert gilt für den ganzen Rotor und berechnet sich, wie noch zu zeigen ist, aus einer Integration bzw. Summation über der Rotorfläche mit den dort vorhandenen Einzelwirkungsgraden.

6.5 Berechnung des Abminderungsfaktors

Bisher noch ungeklärt ist die Berechnung des Abminderungsfaktors ξ, der in die Berechnungsgleichungen der Einzelwirkungsgrade c_{pi} und η_P eingeht. Der Abminderungsfaktor kann nicht aus seiner Definition

$$\xi = v_3/v_1 \qquad \text{Gl. 3}$$

berechnet werden, da die Geschwindigkeit v_3 nicht bekannt ist. Da die Abminderung letztlich ja vom Flügel abhängt, kann sie aus der Flügelgeometrie berechnet werden:

$$\xi = \frac{B-1}{B+1} \qquad \text{Gl. 13}$$

$$B = \frac{8 \cdot \pi}{c_a \cdot z} \cdot \frac{r}{t} \cdot \frac{1}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0{}^2 + 1}} \qquad \text{Gl. 14}$$

Dabei ist B nur ein Platzhalter. Der Abminderungfaktor wird hier aus der Formel zur Flügeltiefe nach D. le Gourieres berechnet. /2/. Es muß folgendes beachtet werden:

* Der Auftriebsbeiwert c_a ist vom Profilanströmwinkel α abhängig.
* Der Profilanströmwinkel ist abhängig von der effektiven Schnellaufzahl und dem Blattwinkel β

$$\alpha = \arctan(1/\lambda_0) - \beta \qquad \text{Gl. 15}$$

* Die effektive Schnellaufzahl λ_0 ist abhängig von der Schnellaufzahl λ und eben wiederum von dem Abminderungsfaktor ξ.

$$\lambda_0 = \lambda \frac{1+\sigma}{1+\xi} \qquad \text{Gl. 16}$$

mit σ nach Gl.7 .

Eine Lösung für den Abminderungsfaktor ist also nur iterativ möglich. Dabei setzt man zunächst $\lambda_0 = \lambda$ und berechnet über α und c_a eine erste Näherung für ξ . Es Kann nun λ_0 nach Gl.16 und Gl.7 genauer berechnet werden.

7. Programm zur Windradberechnung

Das im Rahmen des Seminarvortrages angefertigte Programm berechnet die über die Windradfläche gemittelten Wirkungsgrade, insbesondere den Gesamtleistungsbeiwert c_{Pges}. Das Programm berechnet alle Windräder, die der Beschreibung des Wagner-Rotors entsprechen (vgl. Abb. 1) und seine Grenzstellungen; damit z.B. auch den Horizontalachsrotor.
Die Grobstruktur des Programms entnimmt man Abb.7 . Nach der Eingabe der Geometrie und den Berechnungsanweisungen wird in der ersten Schleife die unabhängige Variable, die Blattspitzenschnellaufzahl λ_t, zur Berechnung der Kurven "Wirkungsgrade über Blattspitzenschnellaufzahl" vorgegeben. In den nächsten beiden Schleifen wird die Integration bzw. Summation über der Windradfläche, also über dem Umlaufwinkel Θ und dem Radius r, durchgeführt. Für jedes Flügelelement wird zunächst, abhängig von seiner Lage (Θ, r) und der Blattspitzenschnellaufzahl die am Flügelelement wirksame Schnellaufzahl und der Abminderungsfaktor gemäß Abschnitt 6.5 berechnet. Die anschließend berechneten Wirkungsgrade multipliziert mit der Fläche des Flügel-(bzw. Flächen)elementes werden jeweils summiert. Teilt man die Summen nach dem Durchlauf der Θ - r-Schleifen durch die Gesamtfläche, so erhält man die gemittelten Wirkungsgrade "idealer Leistungbeiwert" und "Profilreibungs-Verlustfaktor". Der Blattzahlverlustfaktor η_z braucht nur einmal für jede Blattspitzenschnellaufzahl berechnet zu werden, da er für den gesamten Rotor gilt. Mit der Formel

$$c_{Pges} = \eta_z \cdot 1/A \cdot \sum^{A} c_{Pi} \cdot \eta_P \cdot \Delta A \qquad \text{Gl. 17}$$

erhalten wir schließlich auch den Gesamtleistungsbeiwert c_{Pges}. Ist die Berechnung für alle gewählten Blattspitzenschnellaufzahlen durchgeführt, wird eine Wertetabelle und ein Plott ausgegeben.

Programm zur Windradberechnung

Eingabe

Schleife λ_t

Schleife Θ

Schleife r

Berechnung λ

Iterative Berechnung ξ

Berechnung σ, c_{pi}, η_p, ΔA, λ_0

Summieren, jeweils: $c_{pi} \cdot \Delta A$

$\eta_p \cdot \Delta A$

$c_{pi} \cdot \eta_p \cdot \Delta A$

„Integration" über Umfang Θ und Radius r

$$c_{pi} = \frac{1}{A} \cdot \sum c_{pi} \cdot \Delta A$$

$$\eta_p = \frac{1}{A} \cdot \sum \eta_p \cdot \Delta A$$

Berechnung η_z

$$c_{pges} = \eta_z \cdot \frac{1}{A} \sum c_{pi} \cdot \eta_p \cdot \Delta A$$

Ausgabe:
Tabelle, Plott

Abb. 7

8. Ergebnisse

Abb.8 zeigt die Kurven für einen Wagner-Rotor mit Achs- und Konuswinkel von je 45°. Man sieht, daß sich der Verlauf des Blattzahlverlustfaktors (durch einen Punkt "." gekennzeichnet) nicht von Abb.6 unterscheidet. Der ideale Leistungsbeiwert (+) steigt ähnlich Abb.3 an, fällt bei hohen Schnellaufzahlen aber wieder etwas ab. Für hohe Blattspitzenschnellaufzahlen (über λ_t =6) ist dann der stark fallende Profilreibungs-Verlustfaktor begrenzend für den Gesamtleistungsbeiwert.
Die Kurven für den Horizontalachsrotor (Abb.9) verlaufen ähnlich, der direkte Vergleich (Abb.10) zeigt jedoch, daß vor allem der Profilreibungs-Verlustfaktor und damit auch der Gesamtleistungsbeiwert beim Horizontalachsrotor höhere Werte liefert.
Abb.11 zeigt die Auswirkungen der Vergrößerung der Achsneigung bei konstantem Konuswinkel. Der Gesamtleistungsbeiwert fällt mit zunehmendem Achswinkel.
Abb.12 zeigt die Auswirkungen der Vergrößerung des Konuswinkels. Der Gesamtleistungsbeiwert steigt mit zunehmendem Konuswinkel.
Die Ergebnisse des Programms haben gezeigt, daß die Wirkungsgrade des Wagner-Rotors sinken, je weiter man sich von den Winkeln des Horizontalachsrotors entfernt. Es muß weiter berücksichtigt werden, daß die Windradleistung P beim Wagner-Rotor nicht nur durch die schlechteren Wirkungsgrade fällt, sondern auch dadurch, daß sich bei konstanter Flügellänge die Projektionsfläche des Windrades zum Wind verkleinert. Trotzdem hat der Wagner-Rotor seine Berechtigung bei der Nutzung der Windleistung auf See, wie eingangs dargestellt. An Land Können die Kosten für den Turm gegenüber dem Horizontalachsrotor reduziert werden. Ob dies die geringere Leistung bezogen auf die Flügellänge ausgleicht, kann hier nicht geklärt werden.

9. Zusammenfassung

* $P=P_0 \cdot c_{pges}$
* c_{pges} wird aus der Mittelung von verschiedenen Wirkungsgraden über der Windradfläche berechnet.
* Diese Wirkungsgrade erhält man aus einem math./phys. Modell, das
  - Drall,
  - induzierten Widerstand (Randwirbel),
  - Profilverhalten,
    - Reynoldszahleinflüsse (Turbulenzgrad),
    - Reibung und Zähigkeit berücksichtigt.
* Kompressibilität ist nicht berücksichtigt.
* Der Wagner-Rotor schafft die Möglichkeit Windenergie auf See zu nutzen.
* An Land ist der Wagner-Rotor dem Horizontalachsrotor unterlegen.

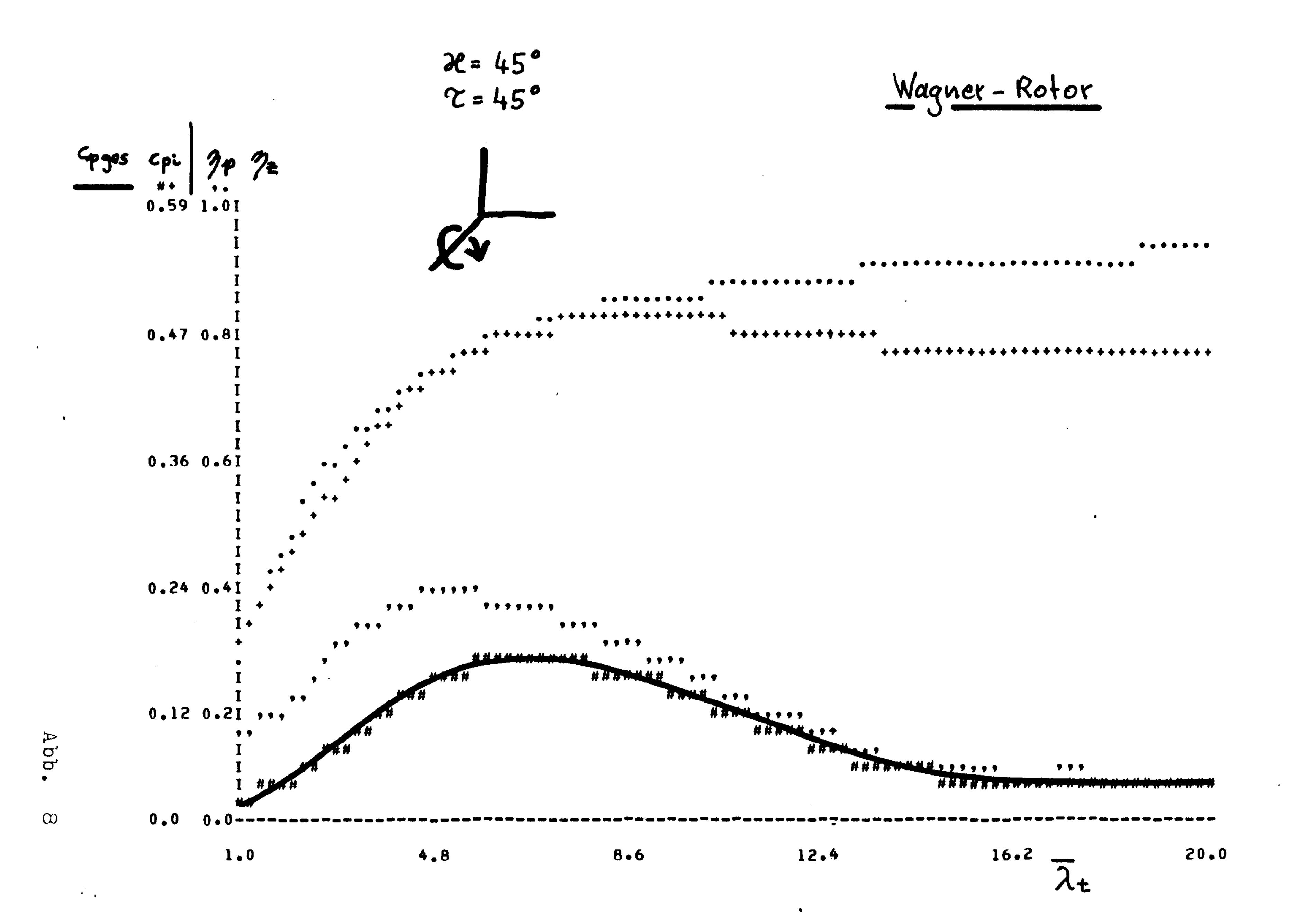
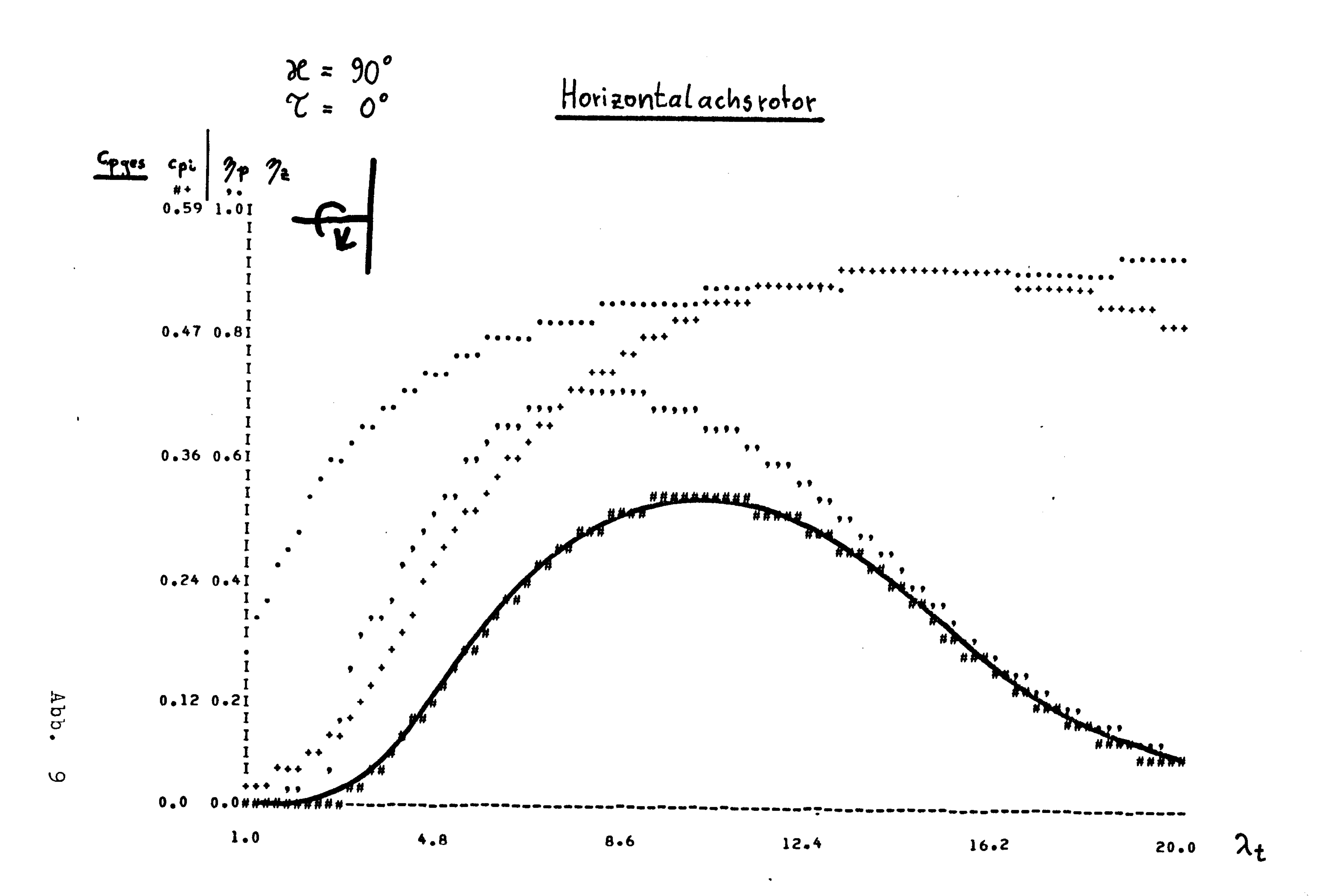
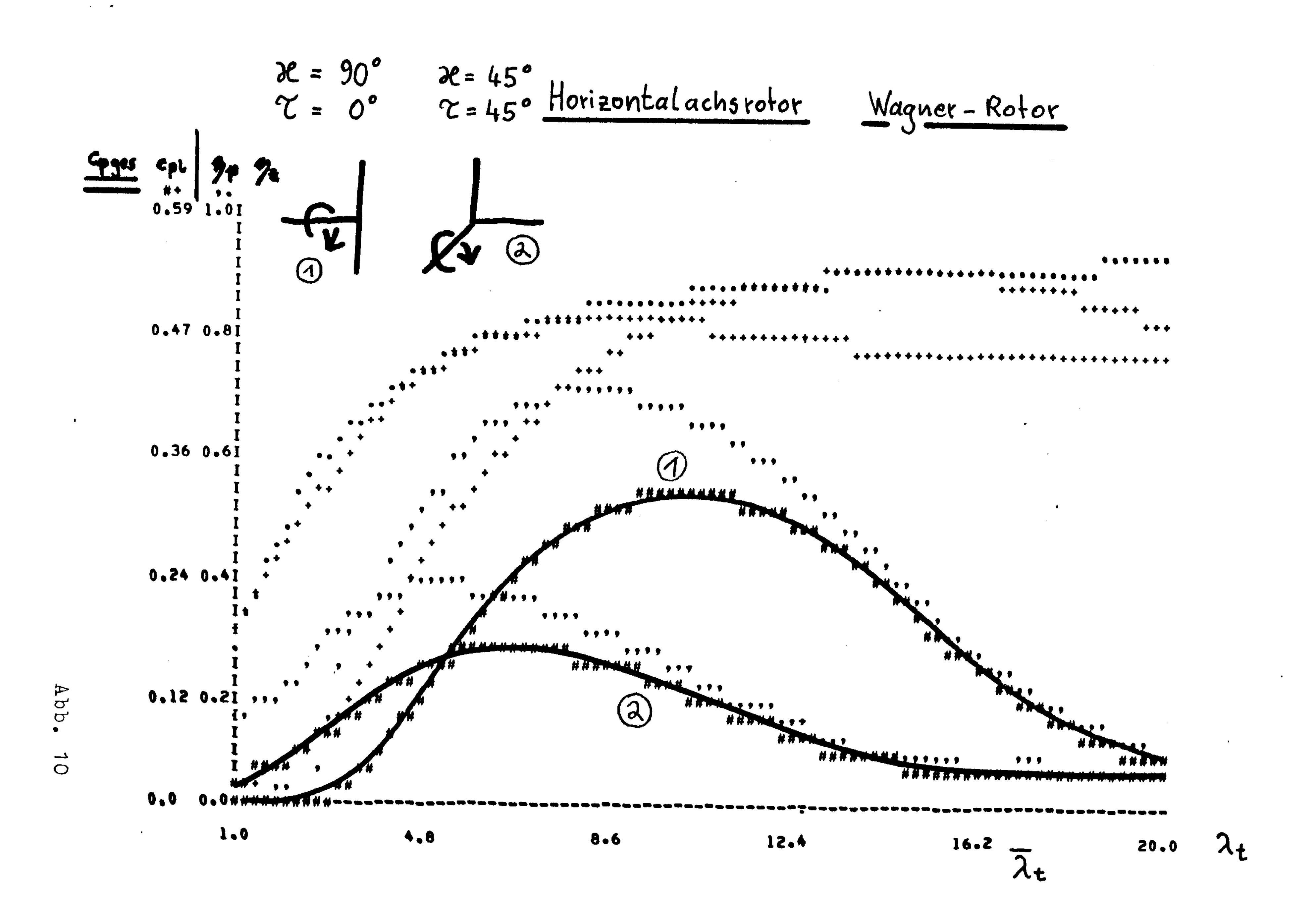

ϰ = 45°
τ = 45°
Wagner - Rotor
cpges cpi ηp ηz
0.59 1.0
0.47 0.8
0.36 0.6
0.24 0.4
0.12 0.2
0.0 0.0
1.0
4.8
8.6
12.4
16.2
20.0
$\overline{\lambda}_t$

Abb. 8



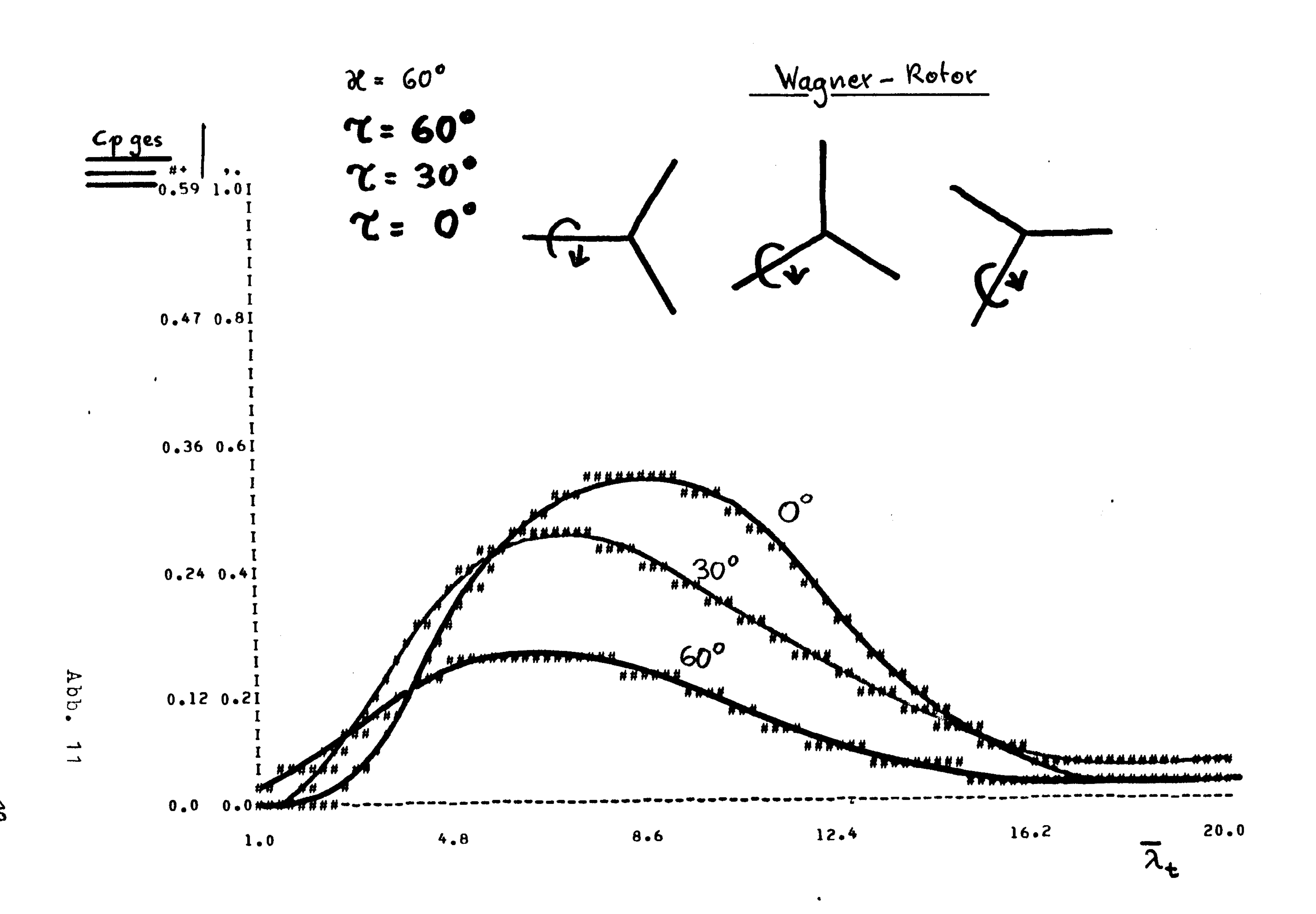
ϰ = 90°
τ = 0°
Horizontalachsrotor
Cpges cpi ηp ηz
0.59 1.0
0.47 0.8
0.36 0.6
0.24 0.4
0.12 0.2
0.0 0.0
1.0
4.8
8.6
12.4
16.2
20.0
λt

Abb. 9



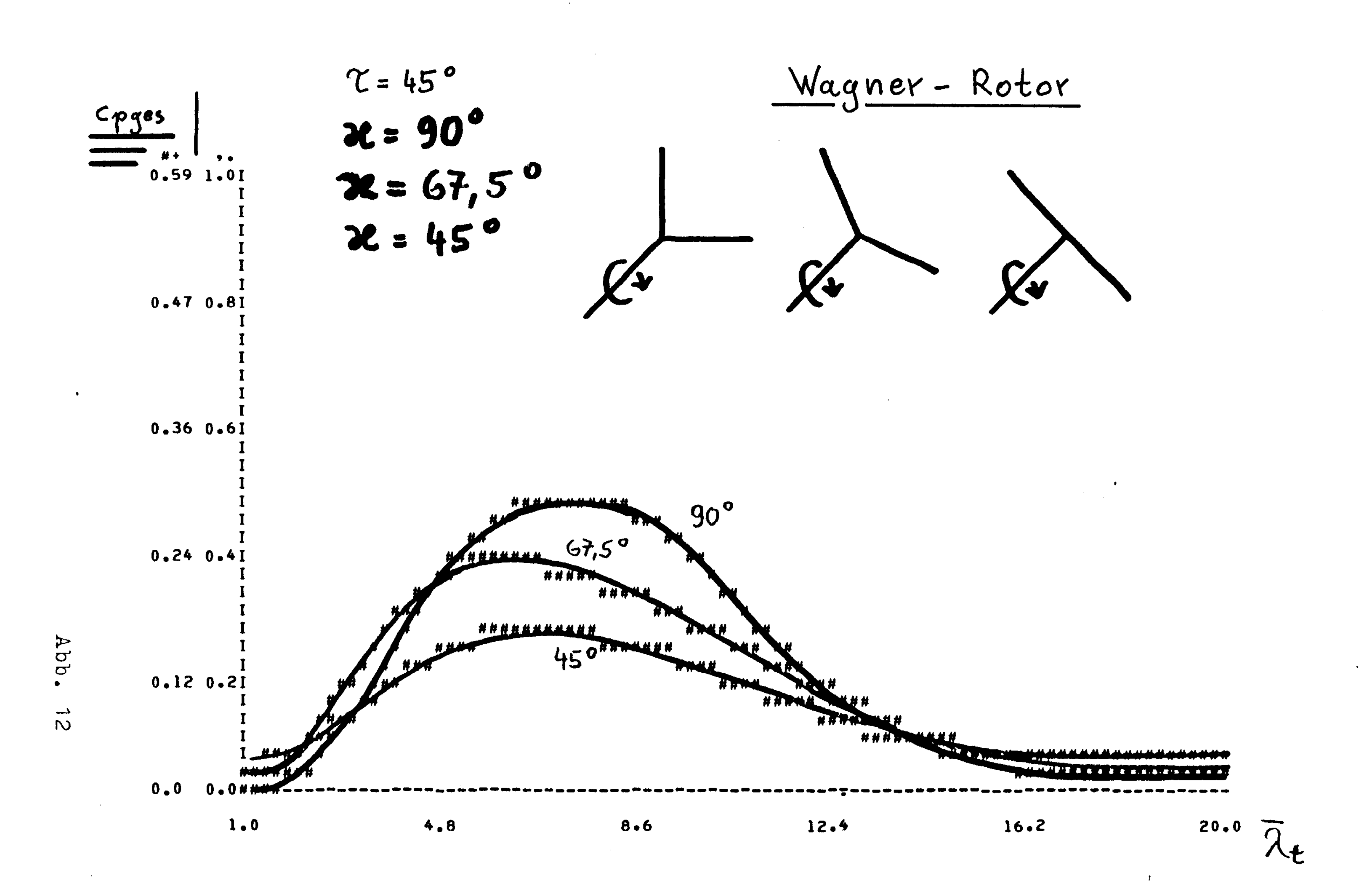
ϰ = 90°
τ = 0°
ϰ = 45°
τ = 45°
Horizontalachsrotor
Wagner - Rotor
Cpges
cpl
0.59 1.0
0.47 0.8
0.36 0.6
0.24 0.4
0.12 0.2
0.0 0.0
1.0
4.8
8.6
12.4
16.2
20.0
λt
λ̄t
1
2

Abb. 10



Wagner - Rotor
ϰ = 60°
τ = 60°
τ = 30°
τ = 0°
Cp ges
#+
..
0.59 1.0
0.47 0.8
0.36 0.6
0.24 0.4
0.12 0.2
0.0 0.0
1.0
4.8
8.6
12.4
16.2
20.0
$\bar{\lambda}_t$
0°
30°
60°

Abb. 11



Wagner - Rotor
τ = 45°
ϰ = 90°
ϰ = 67,5°
ϰ = 45°
cpges
0.59 1.0
0.47 0.8
0.36 0.6
0.24 0.4
0.12 0.2
0.0 0.0
90°
67,5°
45°
1.0
4.8
8.6
12.4
16.2
20.0
λ̄t

Abb. 12

10. Anhang

10.1 Berechnung der Schnellaufzahl λ am Flügelelement

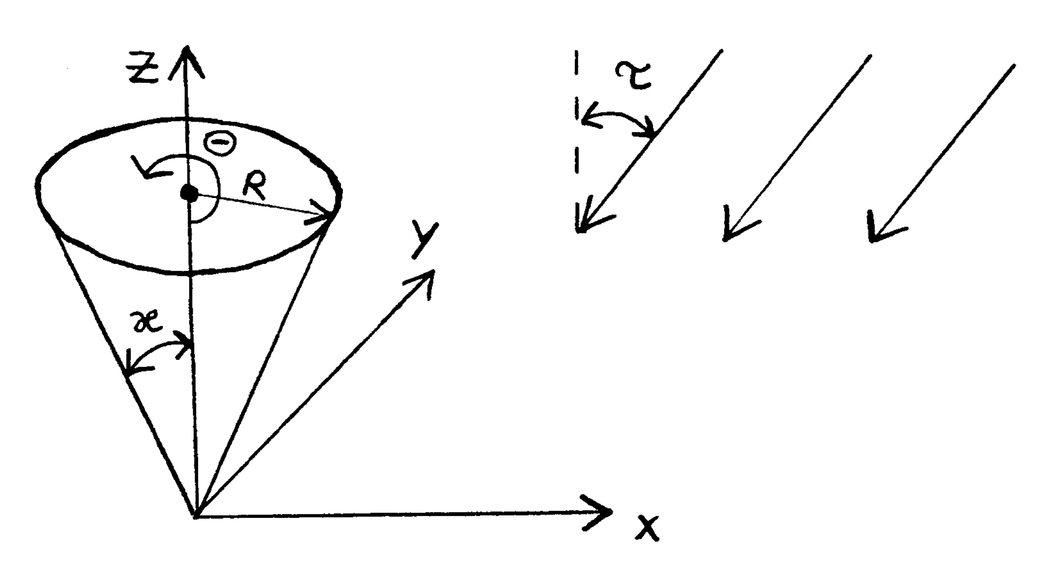


Abb. 13 Koordinatenwahl am Wagner-Rotor

Die Geschwindigkeit $\vec{v}_W$ ist die Windgeschwindigkeit. Es wird gefordert, daß der Wind nur von innen nach außen durch die Kegelfläche strömt. Diese Forderung ist erfüllt, wenn

$$\tau \leq \kappa \qquad \text{Gl. 18}$$

gilt. Die Berechnung der Schnellaufzahl gliedert sich in drei Teile:

- Berechnung der Geschwindigkeit v_1.
- Berechnung der Geschwindigkeit u_1.
- Berechnung von λ aus $\lambda = u_1/v_1$.

v_1: Mit Hilfe der Differentialgeometrie wird die Komponente von $\vec{v}_W$ senkrecht zur Kegelmantelfläche berechnet. Alle Angaben verstehen sich in Kart.-Koordinaten. Die Kegelmantelfläche wird beschrieben durch:

$$\vec{x} = (r \cdot \cos\Theta,\ r \cdot \sin\Theta,\ r \cdot \cot\kappa) \qquad 0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq \Theta \leq 2 \cdot \pi \qquad \text{Gl. 19}$$

Die Windgeschwindigkeit wird beschrieben durch:

$$\vec{v}_W = (-v_W \cdot \sin\tau, 0, -v_W \cdot \cos\tau). \qquad \text{Gl. 19a}$$

Der Normalenvektor $\vec{n}$ steht senkrecht auf der Fläche des Kegelmantels.

$$\vec{n} = \vec{x}_r \times \vec{x}_\Theta \qquad \text{Gl. 20}$$

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} \cos\Theta \\ \sin\Theta \\ \cot\kappa \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -r\cdot\sin\Theta \\ r\cdot\cos\Theta \\ 0 \end{pmatrix} = r\cdot \begin{pmatrix} -\cot\kappa\cdot\cos\Theta \\ -\cot\kappa\cdot\sin\Theta \\ 1 \end{pmatrix} \qquad \text{Gl. 20a}$$

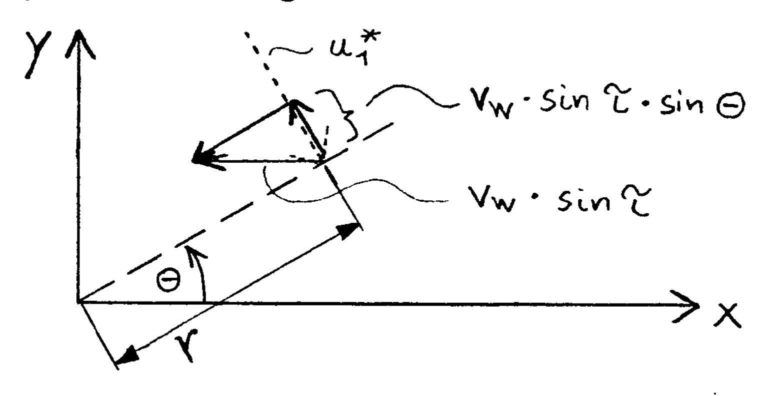
Die Projektion von $\vec{v}_W$ in Richtung $-\vec{n}$ ist

$$v_{W\vec{n}} = \frac{-\vec{v}_W\cdot\vec{n}}{|\vec{n}|} \qquad \text{Gl. 21}$$

Diese Gechwindigkeit senkrecht zum Kegelmantel ist die gesuchte Geschwindigkeit v_1. Es muß die Richtung $-\vec{n}$ gewählt werden, weil $\vec{n}$ nach innen in den Kegel gerichtet ist, von $\vec{v}_W$ aber die Komponente nach außen aus dem Kegel hinaus gesucht ist.

$$v_1 = v_{W\vec{n}} = v_W \cdot \frac{\cos\tau - \sin\tau\cdot\cot\kappa\cdot\cos\Theta}{\sqrt{\cot^2\kappa+1}} \qquad \text{Gl. 21a}$$

Auch die Umfangs- oder Tangentialgeschwindigkeit u_1 ist von der Windgeschwindigkeit abhängig. Sie vergrößert sich, wenn der Flügel dem Wind entgegen läuft und umgekehrt.



$$u_1^* = \dot{\Theta}\cdot r = \omega\cdot r \qquad \text{Gl. 22}$$

$$u_1 = \omega\cdot r - v_W\cdot\sin\tau\cdot\sin\Theta \qquad \text{Gl. 23}$$

Es kann jetzt die Schnellaufzahl λ aus den errechneten Geschwindigkeiten ermittelt werden.

$$\lambda = \frac{u_1}{v_1} = \frac{(\omega\cdot r - v_W\cdot\sin\tau\cdot\sin\Theta)\cdot\sqrt{\cot^2\kappa+1}}{v_W\cdot(\cos\tau - \sin\tau\cdot\cot\kappa\cdot\cos\Theta)} \qquad \text{Gl. 24}$$

Die Blattspitzenschnellaufzahl am Wagner-Rotor wird zweckmäßig so definiert:

$$\lambda_t = \frac{u_1}{v_1} = \frac{\omega \cdot R}{v_w} \qquad \text{Gl. 25}$$

Da dimensionslose Kennzahlen berechnet werden sollen, ist die absolute Größe des Windrades nicht von Bedeutung. Darum wird der Maximalradius R einfach gleich 1 gesetzt:

$$R = 1 \qquad \text{Gl. 26}$$

Damit ist

$$\omega = \lambda_t \cdot v_w \qquad \text{Gl. 27}$$

Setzt man ω nach Gl.27 in Gl.24 ein und kürzt die Größe v_w, so erhält man die Endgleichung

$$\lambda = \frac{(\lambda_t \cdot r - \sin\tau \cdot \sin\theta) \cdot \sqrt{\cot^2\kappa + 1}}{\cos\tau - \sin\tau \cdot \cot\kappa \cdot \cos\theta} \qquad \text{Gl. 28}$$

Es muß beachtet werden, daß r nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen darf. r gibt also das Verhältnis an aktueller Radius:Maximalradius beim untersuchten Windrad.

10.2 Programmliste des Programms zur Windradberechnung mit Hinweisen für Programmbenutzer

```
 20=       PROGRAM CPW (INPUT,OUTPUT,TAPE5=INPUT,TAPE6=OUTPUT)
 30=C
 40=C ***********************************************
 50=C ***                                         ***
 60=C ***  PROGRAMM ZUR WINDRADBERECHNUNG         ***
 70=C ***                                         ***
 80=C ***********************************************
 90=C
100=       REAL LAMMIN,LAMMAX,LAMT,LAM,LAM0,L,LMIN,KAP
110=       CHARACTER PL*1,OBPL*3,WASPL*4,ZAHLPL*8,PARAM*7,KTR*3
120=       DIMENSION CA(-20:91),EPS(-20:91),PL(35,91),ZAHLPL(35),PAWERT(100)
130=       COT(PHI)=1/TAN(PHI)
140=       RAD(PHI)=PHI/180*PI
150=       GRAD(PHI)=PHI*180/PI
160=       PI=3.1415927
170=C
180=C *** EINGABE: GEOMETRIE, BERECHNUNGSANWEISUNGEN ***
190=C
200=       DATA LAMMIN,LAMMAX,DELLAM /1,20,1/
210=       DATA KAP,TAU,DELTHE /90,45,20/
220=       DATA L,LMIN /10,3/
230=       DATA TT,TLMIN /0.5,0.5/
240=       DATA BETT,BETLMIN /0,0/
250=       DATA Z /2/
260=       DATA DELR,GENAU /0.05,0.01/
270=       DATA KTR,OBPL,WASPL /'OFF','OFF','1000'/
280=       DATA PARAM /'KAP    '/
290=       DATA PAWERT /90,67.5,45,97*0/
300=       DATA PAANZ /3/
310=       DATA CA /21*0,.1,.2,.3,.4,.5,.6,.7,.8,.9,1.0,1.1,1.2,1.3,1.2,1.1,
320=      1        1.0,.9,23*.8,15*.9,10*.8,5*.7,5*.6,5*.5,5*.4,6*.2/
330=       DATA EPS/21*0,10,20,25,30,35,40,45,45,40,30,25,20,8*10,
340=      1        10*2,10*1.3,10*0.9,10*0.6,10*0.4,10*0.2,11*0.1/
350=       DATA ALPMIN /0/
360=C
370=C *** 1. EINGABEKONTROLLE ***
380=C
390=       IF(LAMMIN.GT.LAMMAX)  CALL ERROR6('LAMMIN.GT.LAMMAX',*5)
400=       IF(LAMMIN.LE.0)       CALL ERROR6('LAMMIN.LE.0',*5)
410=       IF(DELLAM.LE.0)       CALL ERROR6('DELLAM.LE.0',*5)
420=       IF(DELTHE.LE.0)       CALL ERROR6('DELTHE.LE.0',*5)
430=       IF(360/DELTHE.NE.INT(360/DELTHE))DELTHE=360/(INT(360/DELTHE)+1)
440=       IF(PARAM.NE.'KAP'.AND.PARAM.NE.'TAU'.AND.PARAM.NE.'L'
450=      1   .AND.PARAM.NE.'LMIN'.AND.PARAM.NE.'TT'.AND.PARAM.NE.'TLMIN'
460=      2   .AND.PARAM.NE.'BETT'.AND.PARAM.NE.'BETTLMIN'.AND.PARAM.NE.'Z')
470=      3   THEN
480=       PAANZ=1
490=       PAWERT(1)=0
500=       END IF
510=       TAU=RAD(TAU)
520=       KAP=RAD(KAP)
```

```
 530=      DELTHE=RAD(DELTHE)
 540=C
 550=C *** PLOTTVORBEREITUNG ***
 560=C
 570=      DATA ZAHLPL /'0.0  0.0',5*'          ','0.12 0.2',6*'          ',
 580=     1            '0.24 0.4',6*'          ','0.36 0.6',6*'          ',
 590=     2            '0.47 0.8',6*'          ','0.59 1.0'/
 600=      DATA PL /3185*' '/
 610=      DO8K=1,35
 620=    8 PL(K,1)='I'
 630=      DO9K=1,91
 640=    9 PL(1,K)='-'
 650=      IF(OBPL.NE.'OFF') DELLAM=(LAMMAX-LAMMIN)/90
 660=C
 670=C *** AUSGABE GEWAEHLTER GROESSEN ***
 680=C
 690=      WRITE(6,100) DELR,GENAU,GRAD(DELTHE),KTR,PARAM,
 700=     1            (PAWERT(I),I=1,PAANZ)
 710=  100 FORMAT(//////1H ,10X,'DELR      : ',F10.6/
 720=     1            1H ,10X,'GENAU     : ',F10.6/
 730=     2            1H ,10X,'DELTHE    : ',F10.6//
 740=     3            1H ,10X,'KTR       : ',A3//
 750=     4            1H ,10X,'PARAMETER: ',A7/
 760=     5            1H ,10X,'WERTE     : ',10F10.3/
 770=     6          9(1H ,10X,'            ',10F10.3/))
 780=C
 790=C *** VERAENDERN DES PARAMETERS ***
 800=C
 810=      DO4II=1,PAANZ
 820=      IF(PARAM.EQ.'KAP    ') KAP=RAD(PAWERT(II))
 830=      IF(PARAM.EQ.'TAU    ') TAU=RAD(PAWERT(II))
 840=      IF(PARAM.EQ.'L      ') L=PAWERT(II)
 850=      IF(PARAM.EQ.'LMIN   ') LMIN=PAWERT(II)
 860=      IF(PARAM.EQ.'TT     ') TT=PAWERT(II)
 870=      IF(PARAM.EQ.'TLMIN  ') TLMIN=PAWERT(II)
 880=      IF(PARAM.EQ.'BETT   ') BETT=PAWERT(II)
 890=      IF(PARAM.EQ.'BETLMIN') BETLMIN=PAWERT(II)
 900=      IF(PARAM.EQ.'Z      ') Z=PAWERT(II)
 910=C
 920=C *** 2. EINGABEKONTROLLE ***
 930=C
 940=      IF(TAU.LT.0)         CALL ERROR6('TAU.LT.0',*5)
 950=      IF(GRAD(KAP).GT.90)  CALL ERROR6('KAP.GT.90',*5)
 960=      IF(TAU.GT.KAP)       CALL ERROR6('TAU.GT.KAP',*5)
 970=      IF(LMIN.LT.0)        CALL ERROR6('LMIN.LT.0',*5)
 980=      IF(LMIN.GT.L)        CALL ERROR6('LMIN.GT.L',*5)
 990=      IF(TT.LT.0.OR.TLMIN.LT.0) CALL ERROR6('TT BZW. TLMIN.LT.0',*5)
1000=      IF(Z.LT.0) Z=-Z
1010=      Z=INT(Z)
1020=      IF(TAU.EQ.0.AND.GRAD(KAP).EQ.90) DELTHE=RAD(360)
1030=      WRITE(6,200)GRAD(KAP),GRAD(TAU),L,LMIN,TT,TLMIN,BETT,BETLMIN,Z
1040=  200 FORMAT(1H1,10X,' KAP     TAU      L       LMIN    TT      TLMIN   ',
1050=     1       'BETT   BETLMIN  Z'//1H ,10X,9F7.3/////1H ,12X,
1060=     2       'LAMT    CPI      ETAP    ETA     ETAZ    CPGES'//)
1070=C
1080=C *** VORBEREITUNG ***
1090=C
1100=      RMIN=LMIN/L
1110=      Q=(BETLMIN-BETT)/(1-RMIN)
1120=      RADIUS=L*SIN(KAP)
1130=      T=TT/RADIUS
1140=      U=(TLMIN-TT)/(1-RMIN)/RADIUS
1150=      J=0
1160=C
1170=C *** BERECHNUNG DER WIRKUNGSGRADE ***
1180=C
```

```
1190=         DO3 LAMT=LAMMIN,LAMMAX,DELLAM
1200=         MARKE1=0
1210=         MARKE2=0
1220=         MARKE3=0
1230=         MARKE4=0
1240=         J=J+1
1250=         CPISUM=0
1260=         ETPSUM=0
1270=         ETASUM=0
1280=C
1290=          DO2THE=0,2*PI-DELTHE,DELTHE
1300=          THEM=THE+DELTHE/2
1310=C
1320=            DO1 R=RMIN,1-DELR,DELR
1330=            MARKE11=0
1340=            RM=R+DELR/2
1350=            LAM=(LAMT*RM-SIN(TAU)*SIN(THEM))*SQRT(COT(KAP)**2+1)/
1360=       1         (COS(TAU)-SIN(TAU)*COT(KAP)*COS(THEM))
1370=           CALL SUBXI(LAM,CA,ALPMIN,BETT,Q,T,U,Z,RM,GENAU,XI,ALP,IALP,LAM0,
1380=       1              KTR,MARKE1,MARKE11,MARKE3,MARKE4,*3)
1390=            SIG=SQRT(1+(1-XI**2)/LAM**2)
1400=            CPI=LAM**2*(1+XI)*(SIG-1)
1410=            IF(CPI.GT.0.593) CALL ERROR2(*3)
1420=            IF(CPI.LT.0) CALL ERROR4(*3)
1430=            IF(MARKE11.EQ.1) CPI=-CPI
1440=            EPSM=EPS(IALP)+(ALP-IALP)*(EPS(IALP+1)-EPS(IALP))
1450=            ETAP=2*LAM*(EPSM-LAM0)/(1+XI)/(1+EPSM*LAM0)
1460=            IF(ETAP.GT.1)THEN
1470=C                                                           ** MARKE2 **
1480=             IF(KTR.EQ.'OFF')THEN
1490=             ETAP=1
1500=             MARKE2=2
1510=             ELSE
1520=             CALL ERROR3(*3)
1530=             END IF
1540=            END IF
1550=            IF(ETAP.LT.0) ETAP=0
1560=            DELAK=0.5*SQRT(COT(KAP)**2+1)*((R+DELR)**2-R**2)*DELTHE
1570=            CPISUM=CPISUM+CPI*DELAK
1580=            ETPSUM=ETPSUM+ETAP*DELAK
1590=            ETASUM=ETASUM+CPI*ETAP*DELAK
1600=      1     CONTINUE
1610=C
1620=      2  CONTINUE
1630=C
1640=         AK=SQRT(COT(KAP)**2+1)*1*PI
1650=         ETA=ETASUM/AK
1660=         IF(ETA.GT.1) CALL ERROR3(*3)
1670=         IF(ETA.LT.0) CALL ERROR4(*3)
1680=         ETAZ=(1-1.39/(Z*SQRT(1+LAMT**2)))**2
1690=         IF(ETAZ.GT.1) CALL ERROR3(*3)
1700=         I=NINT(34*ETAZ+1)
1710=         IF(WASPL(4:4).EQ.'1') PL(I,J)='.'
1720=         ETAP=ETPSUM/AK
1730=         IF(ETAP.GT.1) CALL ERROR3(*3)
1740=         I=NINT(34*ETAP+1)
1750=         IF(WASPL(3:3).EQ.'1') PL(I,J)=','
1760=         CPI=CPISUM/AK
1770=         IF(CPI.GT.0.593) CALL ERROR2(*3)
1780=         IF(CPI.LT.0) CALL ERROR4(*3)
1790=         I=NINT(CPI/0.593*34+1)
1800=         IF(WASPL(2:2).EQ.'1') PL(I,J)='+'
1810=         CPGES=ETA*ETAZ
1820=         I=NINT(CPGES/.593*34+1)
1830=         IF(WASPL(1:1).EQ.'1') PL(I,J)='#'
1840=C
```

```
1850=C *** AUSGABE DER WIRKUNGSGRADE DES GESAMTEN ROTORS ***
1860=C
1870=       WRITE(6,300) LAMT,CPI,ETAP,ETA,ETAZ,CPGES,MARKE1,MARKE2,
1880=      1              MARKE3,MARKE4
1890=   300 FORMAT(1H ,10X,6F7.3,60X,4I3)
1900=       IF(J.EQ.50.OR.J.EQ.110.OR.J.EQ.170.OR.J.EQ.230) WRITE(6,301)
1910=   301 FORMAT(1H1)
1920=C
1930=     3 CONTINUE
1940=C
1950=     4 CONTINUE
1960=C
1970=C *** PLOTTAUSGABE ***
1980=C
1990=       IF(OBPL.EQ.'OFF') GOTO 5
2000=       D=(LAMMAX-LAMMIN)/5
2010=       WRITE(6,400) (ZAHLPL(I),(PL(I,J),J=1,91),I=35,1,-1),
2020=      1        LAMMIN,LAMMIN+D,LAMMIN+2*D,LAMMIN+3*D,LAMMIN+4*D,LAMMAX
2030=   400 FORMAT(1H1,1X,'*',117X,'*'////////1H ,10X,' #+    ,.'/
2040=      1        35(1H ,10X,A8,91A1/)/1H ,16X,6(F4.1,14X)////
2050=      2        1H ,1X,'*',117X,'*'////1H ,10X,'CPGES: #'/
2060=      3        1H ,10X,'CPI  : +'/    1H ,10X,'ETAP : ,'/
2070=      4        1H ,10X,'ETAZ : .'////)
2080=C
2090=     5 STOP
2100=       END
2110=C
2120=C *** UNTERPROGRAMM: BERECHNUNG VON XI, ALP, LAM0 ***
2130=C
2140=       SUBROUTINE SUBXI(LAM,CA,ALPMIN,BETT,Q,T,U,Z,RM,GENAU,XI,
2150=      1                 ALP,IALP,LAM0,KTR,MARKE1,MARKE11,MARKE3,MARKE4,*)
2160=       REAL LAM,LAM0
2170=       CHARACTER KTR*3
2180=       DIMENSION CA(-20:90)
2190=       GRAD(PHI)=PHI*180/PI
2200=       PI=3.1415927
2210=       LAM0=LAM
2220=       QT=U*(1-RM)+T
2230=       XIA=0
2240=       GOTO2
2250=C
2260=     1 LAM0=SQRT(4*(LAM**2+1)/(1+XI)**2-1)
2270=       XIA=XI
2280=     2 BET=Q*(1-RM)+BETT
2290=       ALP=GRAD(ATAN(1/LAM0))-BET
2300=       IF(LAM0.LT.0) ALP=ALP+180
2310=       IF((ALP.LT.ALPMIN.OR.ALP.GT.90).AND.KTR.NE.'OFF') CALL ERROR1(*3)
                                                          ** MARKE1 **
2320=C
2330=        IF((ALP.LT.ALPMIN.OR.ALP.GT.90).AND.KTR.EQ.'OFF') THEN
2340=        IF(LAM0.LT.0) LAM0=-LAM0
2350=        IF(ALP.LT.2*ALPMIN-90) CALL ERROR1(3)
2360=        IF(ALP.LT.ALPMIN) ALPNEU=2*ALPMIN-ALP
2370=        IF(ALP.GT.90.AND.ALP.LT.180-ALPMIN) ALPNEU=180-ALP
2380=        IF(ALP.GT.180-ALPMIN) CALL ERROR1(*3)
2390=        ALP=ALPNEU
2400=        MARKE1=1
2410=        MARKE11=1
2420=        END IF
2430=C
2440=       IALP=INT(ALP)
2450=       CAM=CA(IALP)+(ALP-IALP)*(CA(IALP+1)-CA(IALP))
2460=       IF(CAM.LT.0) CALL ERROR5(*3)
                                                          ** MARKE3 **
2470=C
2480=        IF(CAM.LT.1E-3) THEN
2490=        XI=1
2500=        MARKE3=3
```

```
2510=        RETURN
2520=        END IF
2530=       A=8*PI/(CAM*Z) /QT*RM
2540=       B=A/(LAM0*SQRT(LAM0**2+1))
2550=       XI=(B-1)/(B+1)
2560=C                                                          ** MARKE4 **
2570=        IF(XI.LT.0) THEN
2580=        XI=0
2590=        MARKE4=4
2600=        RETURN
2610=        END IF
2620=       IF(ABS((XIA-XI)/XI).GT.GENAU) GOTO 1
2630=       RETURN
2640=     3 RETURN 1
2650=       END
2660=C
2670=C
2680=C *** FEHLERAUSGABE - UNTERPROGRAMME ***
2690=C
2700=       SUBROUTINE ERROR1(*)
2710=       WRITE(6,100)
2720=   100 FORMAT(1H ,10X,'***FEHLER***  WINKEL NICHT ZULAESSIG')
2730=       RETURN 1
2740=       END
2750=C
2760=       SUBROUTINE ERROR2(*)
2770=       WRITE(6,100)
2780=   100 FORMAT(1H ,10X,'***FEHLER***  CPI IST GROESSER ALS 16/27')
2790=       RETURN 1
2800=       END
2810=C
2820=       SUBROUTINE ERROR3(*)
2830=       WRITE(6,100)
2840=   100 FORMAT(1H ,10X,'***FEHLER***  WIRKUNGSGRAD IST GROESSER ALS 1')
2850=       RETURN 1
2860=       END
2870=C
2880=       SUBROUTINE ERROR4(*)
2890=       WRITE(6,100)
2900=   100 FORMAT(1H ,10X,'***FEHLER***  CP ODER WIRKUNGSGRAD IST NEGATIV')
2910=       RETURN 1
2920=       END
2930=C
2940=       SUBROUTINE ERROR5(*)
2950=       WRITE(6,100)
2960=   100 FORMAT(1H ,10X,'***FEHLER***  CA IST NEGATIV')
2970=       RETURN 1
2980=       END
2990=C
3000=       SUBROUTINE ERROR6(A,*)
3010=       CHARACTER A*18
3020=       WRITE(6,100) A
3030=   100 FORMAT(/////1H ,10X,'*** EINGABEFEHLER ***'/1H ,10X,A18/)
3040=       RETURN 1
3050=C
3060=C *************************************
3070=C ***                               ***
3080=C *** HINWEISE FUER PROGRAMM-BENUTZER ***
3090=C ***                               ***
3100=C *************************************
3110=C
3120=C LAMMIN     MINIMALE SCHNELLAUFZAHL AN DER FLUEGELSPITZE
3130=C LAMMAX     MAXIMALE SCHNELLAUFZAHL AN DER FLUEGELSPITZE
3140=C DELLAM     SCHRITTWEITE FUER DIE SCHNELLAUFZAHL AN DER FLUEGELSPITZE
3150=C            ZUR AUSGABE VON TABELLEN. IST EIN PLOTT VERLANGT (OBPL='ON')
3160=C            WIRD DELLAM VOM PROGRAMM SO GEWAEHLT, DASS FUER JEDE DRUCK-
```

```
3170=C          SPALTE EIN WERT BERECHNET WIRD.
3180=C KAP      KONUSWINKEL
3190=C TAU      ACHSWINKEL
3200=C DELTHE   SCHRITTWEITE FUER DIE INTEGRATION UEBER DEM UMFANG.
3210=C          DELTHE WIRD VOM PROGRAMM SO ANGEPASST, DASS ES 360 GRAD
3220=C          OHNE REST TEILT. DIES IST DIE VORAUSSSETZUNG FUER RICHTIGE
3230=C          WIRKUNGSGRADBERECHNUNG.
3240=C L        FLUEGELLAENGE: NABE - BLATTSSPITZE                 *1
3250=C LMIN     LAENGE:         NABE  - BLATTWURZEL                *1
3260=C TT       FLUEGELTIEFE AN DER BLATTSPITZE                    *1    *2
3270=C TLMIN    FLUEGELTIEFE AN DER BLATTWURZEL                    *1    *2
3280=C BETT     BLATTWINKEL  AN DER BLATTSPITZE                          *2
3290=C BETLMIN  BLATTWINKEL  AN DER BLATTWURZEL                          *2
3300=C Z        FLUEGEL-(BLATT-)ZAHL
3310=C DELR     SCHRITTWEITE FUER DIE INTEGRATION UEBER DEM RADIUS
3320=C GENAU    GENAUIGKEIT DER ITERATIVEN BERECHNUNG VON XI
3330=C KTR      KTR='OFF':
3340=C           - VERGROESSERTER ANSTROEMWINKEL IST ZULAESSIG
3350=C             (2*ALPMIN-90.LE.ALP.AND.ALP.LE.180-ALPMIN)
3360=C           - ETAP=1 WIRD FUER ETAP.GT.1 GESETZT
3370=C          KTR='ON ':
3380=C           - NUR NORMALER ANSTROEMWINKEL IST ZULAESSIG
3390=C             (ALPMIN.LE.ALP.AND.ALP.LE.90)
3400=C           - ETAP.GT.1 IST FEHLER
3410=C OBPL     OBPL='ON ': DAS DIAGRAMM MIT WIRKUNGGRADKURVEN WIRD
3420=C                      AUSGEGEBEN.
3430=C          OBPL='OFF': DAS DIAGRAMM MIT WIRKUNGSGRADKURVEN WIRD
3440=C                      NICHT AUGEGEBEN.
3450=C WASPL    WASPL BESTEHT AUS 4 STELLEN: '    '
3460=C           1. STELLE='1': CPGES WIRD AUSGEGEBEN
3470=C           2. STELLE='1': CPI   WIRD AUSGEGEBEN
3480=C           3. STELLE='1': ETAP  WIRD AUSGEGEBEN
3490=C           4. STELLE='1': ETAZ  WIRD AUSGEGEBEN
3500=C          BEI '0': KEINE AUSGABE DES BETREFFENDEN WIRKUNGSGRADES.
3510=C          ES SIND BELIEBIGE KOMBINATIONEN '1','0' MOEGLICH.
3520=C PARAM    ES BESTEHT DIE MOEGLICHKEIT 9 VERSCHIEDENE PARAMETER
3530=C          ANZUWAEHLEN. IN EINEM JOB WIRD DANN FUER DEN GEWAEHLTEN
3540=C          PARAMETER EINE TABELLE FUER JEDEN DER ANGEGEBENEN WERTE
3550=C          BERECHNET. ANSCHLIESSEND WERDEN, FALLS ANGEWAEHLT, DIE
3560=C          WIRKUNGSGRADE FUER JEDEN DIESER WERTE IN  E I N  DIAGRAMM
3570=C          ZUM VERGLEICH GEPLOTTET.
3580=C          PARAM='OFF    ': DIE BERECHNUNG WIRD MIT DEN WERTEN AUS
3590=C                           ZEILE 200 BI 270 DURCHGEFUEHRT.
3600=C          PARAM='KAP    ': DER VERAENDERTE PARAMETER IST KAP
3610=C          PARAM='L      ': DER VERAENDERTE PARAMETER IST L
3620=C          PARAM='LMIN   ': DER VERAENDERTE PARAMETER IST LMIN
3630=C          PARAM='TT     ': DER VERAENDERTE PARAMETER IST TT
3640=C          PARAM='TLMIN  ': DER VERAENDERTE PARAMETER IST TLMIN
3650=C          PARAM='BETT   ': DER VERAENDERTE PARAMETER IST BETT
3660=C          PARAM='BETLMIN': DER VERAENDERTE PARAMETER IST BETLMIN
3670=C          PARAM='Z      ': DER VERAENDERTE PARAMETER IST Z
3680=C PAWERT   PAWERT IST EIN EINDIMENSIONALES ZAHLENFELD DER GROESSE 100.
3690=C          ES MUESSEN IMMER 100 WERTE FUER DEN PARAMETER ANGEGEBEN
3700=C          WERDEN. BEISPIEL FUER PARAM='OFF':
3710=C          290      DATA PAWERT /100*0/
3720=C PAANZ    PAANZ GIBT DIE ANZAHL DER SIGNIFIKANTEN WERTE VON PAWERT AN.
3730=C          WURDE KEIN PARAMETER GEWAEHLT, WIRD PAANZ VOM PROGRAMM
3740=C          GLEICH 1 GESETZT.
3750=C CA       CA IST EIN EINDIMENSIONALES ZAHLENFELD FUER CA(ALP) MIT DER
3760=C          GROESSE 112. CA : AUFTRIEBSBEIWERT. CA(ALP) ENTNIMMT MAN
3770=C          PROFILHANDBUECHERN. FUER JEDEN GANZEN WINKEL ALP VON -20 BIS
3780=C          91 GRAD WIRD  DER ZUGEHOERIGE WERT FUER CA IN ZEILE 310/320
3790=C          ABGESPEICHERT. (SIEHE  ALPMIN)
3800=C EPS      EPS IST EIN ZAHLENFELD, STRUKTURIERT WIE CA, JEDOCH FUER DIE
3810=C          PROFILGLEITZAHL EPS BESTIMMT.
3820=
```

```
3830=C ALPMIN     ALPMIN IST DER WINKEL, BEI DEM CA NEGATIV WIRD.
3840=C            ABGESPEICHERTE WERTE FUER CA UND EPS MIT  ALP.LT.ALPMIN
3850=C            MUESSEN VORHANDEN SEIN, IHRE GROESSE IST ABER NICHT RELEVANT
3860=C LAMT       SCHNELLAUFZAHL AN DER FLUEGELSPITZE
3870=C CPI        IDEALER LEISTUNGSBEIWERT
3880=C ETAP       PROFILREIBUNGS-VERLUSTFAKTOR
3890=C ETA        PRODUKT AUS CPI UND ETAP
3900=C ETAZ       BLATTZAHLVERLUSTFAKTOR
3910=C Q,U,T,RMIN  SIEHE PROGRAMM: *** VORBEREITUNG ***
3920=C MARKE1     PROGRAMMKONTROLLMARKE. MARKE1=1 BEDEUTET:
3930=C             VERGROESSERTER ANSTROEMBEREICH WURDE IN ANSPRUCH GENOMMEN.
3940=C             (SIEHE KTR)
3950=C MARKE2     PROGRAMMKONTROLLMARKE. MARKE2=2 BEDEUTET:
3960=C             BEI ETAP.GT.1 WURDE ETAP=1 GESETZT. (SIEHE KTR)
3970=C MARKE3     PROGRAMMKONTROLLMARKE. MAARKE3=3 BEDEUTET:
3980=C             CAM IST ETWA 0 UND DAHER XI=1 GESETZT WORDEN.
3990=C MARKE4     PROGRAMMKONTROLLMARKE. MARKE4=4 BEDEUTET:
4000=C             XI.LT.0 UND DAHER XI=0 GESETZT WORDEN.
4010=C THE        UMFANGSWINKEL
4020=C THEM       UMFANGSSWINKEL IN DER MITTE DES JEWEILIGEN FLUEGELELEMENTES
4030=C RM         RADIUS IN DER MITTE DES JEWEILIGEN FLUEGELELEMENTES
4040=C LAMO       EFFEKTIVE SCHNELLAUFZAHL
4050=C ALP        WINDANGRIFFSWINKEL
4060=C SIG        DRALLFAKTOR
4070=C DELAK      FLAECHE DES FLUEGELELEMENTES
4080=C AK         GESAMTFLAECHE DES MANTELS DES KEGELSTUMPFES
4090=C
4100=C
4110=C            ANMERKUNGEN:
4120=C
4130=C MIT DEM PROGRAMM SOLL INTERAKTIV GEARBEITET WERDEN. DIE EINGABE DER
4140=C GEOMETRIE UND DER BERECHNUNGSANWEISUNGEN ERFOLGT IM EDITOR:
4150=C            1) LIST,200,300
4160=C            2) IN DEN DATA-ZEILEN NEUE WERTE EINGEBEN
4170=C            3) SEQUENTIELLE DATEI ERSTELLEN
4180=C            4) ......... BATCH,LDN,INPUT,MINE  .......
4190=C
4200=C *1: DIE DIMENSIONSBEHAFTETEN GROESSEN L, LMIN, TT, TLMIN MUESSEN SO
4210=C     EINGEGEBEN WERDEN, DASS IHRE VERHAELTNISSE DEM WINDRAD ENT-
4220=C     SPRECHEN. DIE ABSOLUTEN GROESSEN SIND OHNE BEDEUTUNG.
4230=C *2: FUER DEN FLUEGELTIEFENVERLAUF UND DIE SCHRAENKUNG WIRD EINE
4240=C     LINEARE VERAENDERUNG UEBER DEM RADIUS ANGENOMMEN.
4250=C
4260=C
4270=      END
```

10.3 Eingabewerte für die Beispielplotts zum Seminarvortrag und Wertetabellen

Es wurde mit dem symmetrischen Profil NACA 0015 gerechnet. Die Eingabewerte für die Felder CA und EPS sind den Programmzeilen 310 bis 340 zu entnehmen. /4/.

KAP	TAU	L	LMIN	TT	TLMIN	BETT	BETLMIN	Z
45.000	45.000	10.000	3.000	.500	.500	0.000	0.000	2.000

LAMT	CPI	ETAP	ETA	ETAZ	CPGES
1.000	.181	.137	.063	.259	.016
2.000	.258	.195	.085	.475	.041
3.000	.329	.293	.122	.609	.074
4.000	.392	.341	.154	.691	.106
5.000	.438	.380	.188	.746	.140
6.000	.463	.364	.191	.785	.150
7.000	.477	.350	.192	.813	.156
8.000	.485	.313	.176	.835	.147
9.000	.485	.280	.159	.852	.136
10.000	.483	.237	.135	.866	.117
11.000	.478	.191	.107	.878	.094
12.000	.472	.164	.089	.888	.079
13.000	.466	.124	.066	.896	.059
14.000	.460	.097	.050	.903	.045
15.000	.456	.091	.046	.910	.042
16.000	.455	.072	.036	.915	.033
17.000	.455	.075	.038	.920	.035
18.000	.455	.067	.033	.924	.031
19.000	.455	.065	.032	.928	.030
20.000	.455	.070	.035	.932	.033

DELR : .050000
GENAU : .010000
DELTHE : 20.000000

KTR : OFF

PARAMETER: OFF
WERTE : 0.000

KAP	TAU	L	LMIN	TT	TLMIN	BETT	BETLMIN	Z
90.000	0.000	10.000	3.000	.500	.500	0.000	0.000	2.000

LAMT	CPI	ETAP	ETA	ETAZ	CPGES
1.000	.015	.002	.000	.259	.000
2.000	.041	.014	.001	.475	.000
3.000	.081	.191	.021	.609	.013
4.000	.163	.363	.077	.691	.053
5.000	.255	.528	.166	.746	.124
6.000	.327	.632	.240	.785	.188
7.000	.384	.686	.297	.813	.241
8.000	.430	.709	.336	.835	.281
9.000	.466	.692	.355	.852	.302
10.000	.493	.664	.360	.866	.312
11.000	.511	.629	.353	.878	.310
12.000	.524	.574	.331	.888	.294
13.000	.533	.512	.300	.896	.268
14.000	.537	.440	.259	.903	.234
15.000	.538	.354	.209	.910	.190
16.000	.534	.276	.162	.915	.148
17.000	.528	.213	.123	.920	.113
18.000	.518	.164	.093	.924	.086
19.000	.505	.123	.068	.928	.063
20.000	.490	.092	.049	.932	.046

```
DELR      :      .050000
GENAU     :      .010000
DELTHE    :   360.000000

KTR       :  OFF

PARAMETER:  OFF
WERTE     :         0.000
```

KAP	TAU	L	LMIN	TT	TLMIN	BETT	BETLMIN	Z
60.000	60.000	10.000	3.000	.500	.500	0.000	0.000	2.000

LAMT	CPI	ETAP	ETA	ETAZ	CPGES
1.000	.183	.159	.067	.259	.017
2.000	.260	.209	.086	.475	.041
3.000	.333	.306	.120	.609	.073
4.000	.394	.354	.155	.691	.107
5.000	.437	.371	.179	.746	.134
6.000	.462	.349	.180	.785	.141
7.000	.476	.315	.171	.813	.139
8.000	.485	.280	.157	.835	.131
9.000	.487	.243	.139	.852	.118
10.000	.485	.197	.113	.866	.098
11.000	.482	.152	.087	.878	.077
12.000	.476	.114	.064	.888	.057
13.000	.471	.088	.048	.896	.043
14.000	.465	.066	.035	.903	.032
15.000	.460	.054	.028	.910	.025
16.000	.456	.045	.022	.915	.021
17.000	.455	.034	.017	.920	.016
18.000	.455	.030	.015	.924	.014
19.000	.455	.031	.016	.928	.014
20.000	.455	.034	.017	.932	.016

DELR : .050000
GENAU : .010000
DELTHE : 20.000000

KTR : OFF

PARAMETER: TAU
WERTE : 60.000 30.000 0.000

KAP	TAU	L	LMIN	TT	TLMIN	BETT	BETLMIN	Z
60.000	30.000	10.000	3.000	.500	.500	0.000	0.000	2.000

LAMT	CPI	ETAP	ETA	ETAZ	CPGES
1.000	.032	.007	.000	.259	.000
2.000	.102	.169	.036	.475	.017
3.000	.211	.398	.127	.609	.077
4.000	.319	.551	.222	.691	.154
5.000	.400	.627	.292	.746	.218
6.000	.454	.637	.324	.785	.254
7.000	.488	.602	.321	.813	.261
8.000	.506	.536	.295	.835	.246
9.000	.511	.458	.259	.852	.220
10.000	.508	.386	.221	.866	.192
11.000	.504	.323	.186	.878	.163
12.000	.498	.268	.154	.888	.137
13.000	.492	.214	.121	.896	.109
14.000	.485	.162	.091	.903	.082
15.000	.477	.125	.068	.910	.062
16.000	.470	.091	.048	.915	.044
17.000	.463	.073	.038	.920	.035
18.000	.458	.053	.027	.924	.025
19.000	.455	.055	.028	.928	.026
20.000	.455	.062	.031	.932	.029

KAP	TAU	L	LMIN	TT	TLMIN	BETT	BETLMIN	Z
60.000	0.000	10.000	3.000	.500	.500	0.000	0.000	2.000

LAMT	CPI	ETAP	ETA	ETAZ	CPGES
1.000	.022	.002	.000	.259	.000
2.000	.060	.011	.001	.475	.000
3.000	.128	.289	.050	.609	.031
4.000	.253	.477	.152	.691	.105
5.000	.348	.611	.250	.746	.186
6.000	.417	.686	.323	.785	.253
7.000	.468	.706	.364	.813	.296
8.000	.503	.681	.377	.835	.315
9.000	.524	.636	.366	.852	.312
10.000	.534	.572	.336	.866	.291
11.000	.537	.489	.289	.878	.253
12.000	.534	.391	.229	.888	.203
13.000	.524	.285	.164	.896	.147
14.000	.509	.204	.114	.903	.103
15.000	.489	.144	.077	.910	.070
16.000	.465	.097	.049	.915	.045
17.000	.454	.081	.040	.920	.037
18.000	.454	.086	.043	.924	.040
19.000	.454	.060	.030	.928	.028
20.000	.454	.041	.020	.932	.019

KAP	TAU	L	LMIN	TT	TLMIN	BETT	BETLMIN	Z
90.000	45.000	10.000	3.000	.500	.500	0.000	0.000	2.000

LAMT	CPI	ETAP	ETA	ETAZ	CPGES
1.000	.030	.009	.000	.259	.000
2.000	.086	.184	.030	.475	.014
3.000	.192	.419	.114	.609	.069
4.000	.301	.582	.216	.691	.149
5.000	.382	.666	.294	.746	.219
6.000	.441	.683	.337	.785	.264
7.000	.482	.659	.351	.813	.285
8.000	.511	.603	.338	.835	.282
9.000	.528	.522	.302	.852	.257
10.000	.535	.420	.246	.866	.213
11.000	.534	.310	.181	.878	.159
12.000	.526	.217	.126	.888	.112
13.000	.511	.150	.085	.896	.076
14.000	.492	.101	.055	.903	.050
15.000	.471	.071	.037	.910	.034
16.000	.458	.053	.027	.915	.025
17.000	.455	.038	.019	.920	.017
18.000	.455	.040	.020	.924	.019
19.000	.455	.039	.019	.928	.018
20.000	.455	.032	.016	.932	.015

DELR : .050000
GENAU : .010000
DELTHE : 20.000000

KTR : OFF

PARAMETER: KAP
WERTE : 90.000 67.500 45.000

KAP	TAU	L	LMIN	TT	TLMIN	BETT	BETLMIN	Z
67.500	45.000	10.000	3.000	.500	.500	0.000	0.000	2.000

LAMT	CPI	ETAP	ETA	ETAZ	CPGES
1.000	.045	.072	.009	.259	.002
2.000	.147	.267	.081	.475	.038
3.000	.255	.463	.173	.609	.105
4.000	.352	.570	.248	.691	.171
5.000	.421	.599	.287	.746	.214
6.000	.464	.564	.296	.785	.224
7.000	.487	.503	.256	.813	.216
8.000	.495	.438	.239	.835	.200
9.000	.499	.374	.211	.852	.179
10.000	.501	.318	.182	.866	.158
11.000	.498	.260	.150	.878	.131
12.000	.493	.205	.118	.888	.105
13.000	.488	.155	.088	.896	.079
14.000	.481	.114	.064	.903	.058
15.000	.475	.085	.047	.910	.042
16.000	.468	.076	.040	.915	.037
17.000	.462	.063	.032	.920	.030
18.000	.457	.059	.030	.924	.028
19.000	.455	.052	.026	.928	.024
20.000	.455	.045	.022	.932	.021

11. Literaturverzeichnis

/1/ Hütter,U.: Windkraftmaschinen. In: HUETTE. Des Ingenieuers Taschenbuch - Maschinenbau Bd II A. Berlin 1954.
/2/ Wagner : Projekthandbuch. Listlandstr. 7, 2282 List/Sylt. 1984. Unveröffentlicht.
/3/ Gourieres, D. le: Wind Power Plant. Oxford 1982.
/4/ Miley, S. J.: A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications. Texas 1982.